

**RESTAURACIÓN DEL CAUCE DE LA QUEBRADA EL CHUMBIMBO
EN LA FACULTAD DE MINAS E INGEOMINAS**

ESTUDIO TECNICO

**POR
LEONARDO ANTONIO HENAO MONSALVE
JULIAN DAVID ROJO HERNANDEZ
JHON FREDY TIGA ENTRALGO**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS
2009**

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	2
INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
1 GENERALIDADES	9
1.1 Localización	9
1.2 Antecedentes	11
2 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	13
2.1 Punto Crítico	13
2.2 Reconocimiento aguas arriba del punto crítico	13
2.3 Reconocimiento aguas abajo del punto crítico	18
2.4 Conclusiones	22
2.4.1 Socavación	22
2.4.2 Capacidad hidráulica del canal	23
2.4.3 Represamiento	23
3 ANALISIS GEOMORFOLOGICO DE LA CUENCA	23
3.1 Geología Regional	23
3.2 Geomorfología	25
3.3 Procesos Morfodinámicos	27
3.4 Geotecnia	27
3.5 Usos del Suelo	28
3.6 Perfil altimétrico	29
3.7 Pendientes	31
3.8 Parámetros Morfométricos	32
4 ANALISIS GEOMORFOLÓGICO DEL CAUCE	33
4.1 Clasificación de la cuenca y la Corriente	33
4.2 Mediciones de campo	33
4.2.1 Conteo de Piedras	33
4.2.2 Caracterización de las bancas	37
5 ESTUDIO HIDROLÓGICO	38
5.1 Climatología de la Zona	38
5.2 Tiempo de Concentración	39
5.3 Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia IDF	39

5.4	Intensidad de la Lluvia de diseño	40
5.5	Precipitación de diseño	41
5.6	Distribución de la lluvia en el tiempo y cálculo del hietograma total y de precipitación efectiva	41
5.7	Caudal de Diseño	44
5.7.1	METODO DE WILLIAMS Y HANN, SNYDER Y SCS	45
5.7.2	METODO RACIONAL	46
5.7.3	RESUMEN Y DEFINICION DEL CAUDAL DE DISEÑO	48
6	MODELAMIENTO HIDRAULICO DEL SECTOR ADEMINAS-INGEOMINAS	49
6.1	Levantamiento Topográfico	49
6.2	Batimetría	50
6.3	Hidráulica sin considerar sedimentos	52
6.4	Hidráulica con transporte de sedimentos	54
6.4.1	Re-escalamiento de la curva granulométrica	54
6.4.2	Estimación de la carga en la quebrada el Chumbimbo.	56
6.4.3	Hidráulica con sedimentos	57
7	SOLUCION PROPUESTA	61
7.1	Diseño de disipadores en saltos y pozos	61
7.1.1	Datos de campo	61
7.1.2	Dimensionamiento de los saltos y pozos	63
7.2	Diseño de la protección para la bancas	63
7.2.1	Dimensionamiento del geocolchón	63
7.3	Re-dimensionamiento del box culvert de la carrera 80	64
7.4	Galibo mínimo para el puente peatonal de la finca Las Mercedes (abscisa k0 + 88.7m).	65
7.5	Dimensionamiento de presas en INGEOMINAS	66
7.6	Modelamiento hidraulico de la solución	68
7.6.1	Perfil con la sección de saltos y pozos	68
7.6.2	Box culvert de 2.6 m. de altura	69
7.6.3	Niveles de flujo en las presas	69
7.6.4	Parametros hidraulicos del flujo	76
	BIBLIOGRAFÍA	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización de la cuenca de la quebrada El Chumbimbo	10
Figura 1.2 Ubicación del punto critico	11
Figura. 2.1 Socavación de la margen derecha de la quebrada en el sector Facultad de Minas.	14
Figura. 2.2 Socavación y desprendimiento de material de la margen derecha de la quebrada El Chumbimbo en el sector Facultad de Minas.	14
Figura. 2.3 Detención de rocas y entrega de aguas domesticas a la entrada del box culvert de la carrera 80.	15
Figura. 2.4. Socavación local en el box culvert de la Carrera 87 A	15
Figura. 2.6 Hundimiento de la vía ocasionado por procesos de incisión en la quebrada el Chumbimbo.	16
Figura. 2.7 Socavación de la cimentación del box-culvert de la carrera 85.	16
Figura. 2.8. Proceso de reptación en un sector de la quebrada El Chumbimbo.	17
Figura. 2.9 Procesos de incisión en la quebrada El Chumbimbo.	17
Figura 2.10. Aportes de aguas lluvias y domesticas al cauce de la quebrada el Chumbimbo.	18
Figura. 2. 11: Trasvase quebrada Moñonga	18
Figura 2.12. Box culvert de la Carrera 80, sector INGEOMINAS.	19
Figura 2.13 Presa 1 aguas abajo del box culvert de la Carrera 80.	19
Figura 2.14. Presa 1, vista aguas arriba.	20
Figura 2.15. Presa 2	20
Figura 2.16. Presa 3	20
Figura. 2.17. Deslizamientos en la margen izquierda sección transversal de la presa 3	21
Figura. 2.18. Vista desde la presa 3.	21
Figura. 2.19. Detalle de la socavación.	21
Figura.2.20. Box culvert Unidad Residencial Jorge Robledo predios de INGEOMINAS	22
Figura 3.1 Geología regional	24
Figura 3.2 Mapa Geomorfológico de la zona de estudio	25
Figura 3.3 Secciones típicas de la cuenca quebrada el chumbimbo	27
Figura 3.4 Usos del Suelo para la quebrada el Chumbimbo	29
Figura 3.5 Perfil Altimétrico de la quebrada Chumbimbo hasta su nivel base en la quebrada la Malpaso.	30
Figura 3.6 Perfil de la quebrada la quebrada El Chumbimbo hasta el tramo de estudio.	30
Figura 3.7 Mapa de pendiente de la cuenca de la quebrada Chumbimbo	31
Figura 3.8 Modelo digital del terreno de la Altimetría para la quebrada el Chumbimbo.	32
Figura 4.1. Trabajo de campo. Conteo de piedras	34
Figura 4.2. Distribución de frecuencia del tamaño de granos.	35
Figura 4.3 Curva granulométrica.	35
Figura 4.4 Esquema característico de las bancas	37
Figura 5.1 Curvas IDF para la estación San Cristóbal.	40
Figura 5.2 Distribución temporal de la lluvia para la estación Medina	43
Figura 5.3 Distribución de la lluvia en el tiempo para diferentes probabilidades de excedencia	43
Figura 5.4 Análisis de la sensibilidad para la distribución de la lluvia en el tiempo	44
Figura 5.5 Hidrograma unitario y de escorrentía directa con el método de Williams y Hann.	45
Figura 5.6. Hidrograma de escorrentía directa con el método de Snyder.	45
Figura 5.7. Hidrograma de escorrentía directa con el método del SCS.	46

Figura 5.8. Caudal para diferentes periodos de retorno calculados utilizando el método racional.	47
Figura 5.9 Ajuste semi-logarítmico de los caudales para cada método, Williams y Hann, Snyder, SCS	48
Figura 6.1. Curvas de nivel obtenidas para el tramo Facultad de Minas - Ingeominas	50
Figura 6.2. Vista en planta de las secciones transversales y del box-culvert de la carrera 80.	51
Figura 6.3 Secciones transversales típicas del box-culvert que cruza la carrera 80	52
Figura 6.4 Perfil de flujo para un periodo de retorno de 100 años.	52
Figura 6.5 Perfil de flujo para un periodo de retorno de 100 años a la entrada del box-culvert	53
Figura 6.6 Niveles de agua en las secciones típicas para la creciente de los 100 años	53
Figura 6.7 Variación del Esfuerzo de cizalladura en el tramo de estudio.	54
Figura 6.8. Re-escalamiento de la curva granulométrica.	56
Figura 6.9. Secciones típicas modificadas.	58
Figura 6.10. Perfil de flujo para un periodo de retorno de 100 años	59
Figura 6.11. Mancha de inundación Quebrada el Chumbimbo, zona Facultad de Minas- INGEOMINAS, Período de retorno de 100 años.	59
Figura 6.12. Mancha de inundación Quebrada el Chumbimbo, zona Facultad de Minas- INGEOMINAS, Período de retorno de 100 años.	60
Figura 7.1 Variables morfológicas de los ríos de montaña- caracterización de saltos y pozos	62
Figura 7.2 Dimensionamiento de saltos y pozos	63
Figura 7.3 Esquema del Geocolchón	64
Figura 7.4 Nivel de agua en el K0+000 sin considerar el box-culvert de la carrera 80	65
Figura 7.5 Abscisa K0+88.69, cota de inundación 1557.98, altura de la lámina de agua 1.8 m.	65
Figura 7.6 Ubicación de las presas en el sector de INGEOMINAS	66
Figura 7.7. Estructura 1 propuesta, vista lateral, Abscisa: K0-24.01	67
Figura 7.8. Estructura 2 propuesta, vista lateral, Abscisa K0-31.01	67
Figura 7.9. Estructura 3 propuesta, vista lateral, Abscisa K0-66.08	68
Figura 7.7 Perfil con saltos y pozos so adecuar box culvert	68
Figura 7.8. Perfil con saltos y pozos y Box culvert de 2.6 m. de altura	69
Figura 7.9. Niveles del flujo en la entrada y salida del box culvert de 2.6 m. de altura	69
Figura 7.10. Estructura 1 propuesta. Absisa K0 – 23.41	70
Figura 7.11. Estructura 1 propuesta, sección transversal. Absisa K0 – 23.41	71
Figura 7.12. Estructura 2 propuesta. K0 – 31.41	71
Figura 7.13. Estructura 2 propuesta, sección transversal. K0 – 31.41	72
Figura 7.14. Presa 1 existente. Absisa K0 – 40.21	72
Figura 7.15. Presa 1 existente, sección transversal. Absisa K0 – 40.21	73
Figura 7.16. Presa 2 existente. Absisa K0 – 59.00	73
Figura 7.17. Presa 2 existente, sección transversal. Absisa K0 – 59.00	74
Figura 7.18. Estructura 3 propuesta. K0 – 66.2	74
Figura 7.19. Estructura 3 propuesta, sección transversal. K0 – 66.2	75
Figura 7.20. Estructura 4 propuesta. K0 – 74.2	75
Figura 7.21. Estructura 4 propuesta, sección transversal. K0 – 74.2	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Localización de la cuenca de la quebrada El Chumbimbo.	10
Tabla 3.1. Usos del suelo, participación espacial y valores CN en la quebrada El Chumbimbo.	29
Tabla 3.2 Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Chumbimbo	32
Tabla 4.1. Distribución granulométrica. Conteo de piedras.	34
Tabla 4.2. Porcentaje por clases de material	35
Tabla 4.3. Diámetros característicos	36
Tabla 4.5. Rugosidad en función del diámetro de las partículas	36
Tabla 4.6 Rugosidad estimada con diferentes ecuaciones	37
Tabla 5.1 Cálculo de tiempos de concentración	39
Tabla 5.2. Parámetros de las curvas IDF para la estación San Cristóbal.	40
Tabla 5.3. Intensidad de diseño para diferentes periodos de retorno	41
Tabla 5.4 Precipitación de diseño para diferentes periodos de retorno	41
Tabla 5.5 Valores de CN para la cuenca Chumbimbo-Moñonga.	42
Tabla 5.5 Usos del suelo Cuenca Chumbimbo-Moñonga	46
Tabla 5.6 Coeficientes "C" Cuenca Chumbimbo-Moñonga	47
Tabla 5.7 Caudales por el método racional	47
Tabla 5.8. Resumen de las metodologías y definición del caudal de diseño para diferentes periodos de retorno	48
Tabla 7.1 datos de campo obtenidos para la quebrada el Chumbimbo	62
Tabla 9.1. Cantidades de obra y presupuestos.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9.2. Resumen de costos directos y análisis de AIU.	¡Error! Marcador no definido.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Lilian Posada García, de la escuela de Geociencias y Medio Ambiente por su colaboración, asesoría y disposición para atendernos. Sus enseñanzas han sido el fundamento para el desarrollo del presente documento.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo atrás La Quebrada El Chumbimbo en el sector de Ademinas, a presentado problemas de socavación del cauce y desprendimiento de las bancas. Por lo tanto la Administración de la Facultad de Minas en cabeza del Decano Juan Manuel Restrepo Vélez ha solicitado un estudio a la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente con el objeto de hacer el diagnóstico y planteamiento de la solución al problema que se presenta.

La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo está enfocada en un estudio hidrológico e hidráulico del tramo de la quebrada. El estudio se resume en las siguientes etapas: recopilación de información, visita de campo, análisis geomorfológico, hidrológico e hidráulico, planteamiento de la solución y costos asociados a esta.

En términos generales la conclusión del estudio muestra que la alteración de las condiciones de flujo dadas por el trasvase de la quebrada La Moñonga a la quebrada El Chumbimbo y el proceso de urbanización de la cuenca a alterado el régimen de caudales, incrementado el caudal medio y la variabilidad de estos, es decir, los caudales máximos se han incrementado.

Una vez realizadas las etapas de estudio requeridas se proponen algunas alternativas de solución que buscan contrarrestar los procesos erosivos y de socavación que actualmente se llevan a cabo en las bancas y cauce de la quebrada El Chumbimbo.

Estas soluciones consisten en: Protección de las bancas implementando un tipo de recubrimiento denominado Geocolchón, control del gradiente del cauce de la quebrada a través de la implementación de un sistema de saltos y pozos, construcción de presas intermedias en el sector de INGEOMINAS y el recinto de las presas existentes que presentan socavación.

El informe esta organizado de la siguiente forma: Capitulo 1 presenta generalidades del proyecto como lo son la ubicación del mismo y algunos antecedentes. El capitulo 2 presenta la identificación del problema en base a las observaciones de campo. El capitulo 3 muestra el Análisis geomorfológico de la cuenca, mientras que el capitulo 4 describe el procedimiento para recolectar la información necesaria y el trabajo de campo. El capitulo 5 presenta el estudio hidrológico. El capitulo 6 muestra el modelamiento hidráulico de la sección de estudio. El capitulo 7 presenta el diseño y el capitulo 8 hace referencia al presupuesto y algunas recomendaciones constructivas para la estructura de disipación.

El grupo de trabajo que participo en estudio consta del siguiente personal:

Estudiante John Fredy Tiga, Escuela de Ingeniería Civil
Estudiante Julián David Rojo, Escuela de Ingeniería Civil
Estudiante Leonardo Henao, Escuela de Ingeniería Civil
Profesor Luís Fernando Carvajal, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Profesora Lilian Posada García, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

1 GENERALIDADES

La cuenca de la quebrada Chumbimbo nace en el área urbana del municipio de Medellín, lo cual la hace una cuenca visiblemente intervenida y dentro de los muchos cambios a los cuales ha sido sometida, está el trasvase del canal principal de la quebrada La Moñonga a la altura de la urbanización Nebraska, aguas arriba de la Facultad de Minas, por tanto las aguas que recibe la quebrada el Chumbimbo, no solamente provienen de su cuenca y de los alcantarillados de aguas domésticas y aguas lluvias, sino también de una cuenca vecina, donde parte del área de ésta última corresponde a una zona rural.

Los procesos morfodinámicos más importantes que se presentan se deben más a factores antrópicos que a las condiciones mismas del terreno. Entre estos factores están: la desviación del cauce de la quebrada la Moñonga a la quebrada el Chumbimbo, la construcción de estructuras hidráulicas como muros y box culvert, la urbanización en zonas de retiro y sitios de pendientes fuertes afectando la estabilidad de algunos sectores en la cuenca. Además, de la existencia de botaderos de escombros y basuras, entre otros.

Entre los aspectos importantes de la cuenca se destaca la gran cantidad de instituciones que se ubican en ella, sobresalen: La Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, El Colegio Mayor, el Tecnológico Pascual Bravo, la Facultad de Zootecnia de la Universidad de Antioquia, Ingeominas, el Instituto Tecnológico Metropolitano, además de un número alto de colegios y escuelas.

Las aguas de la quebrada El Chumbimbo y la Moñonga tienen un deterioro alto en su calidad, debido a la utilización propia y de sus afluentes como cuerpo receptor de las aguas servidas provenientes de los barrios asentados en el área de la cuenca.

1.1 Localización

La cuenca El Chumbimbo está ubicada en la Zona Noroccidental del municipio de Medellín y forma parte de la vertiente occidental del Río Medellín (Figura 1.1). La Quebrada el Chumbimbo nace en la cota 1736 m.s.n.m y desemboca en la Quebrada Malpaso cerca de las instalaciones de Colpisos a una altura de 1487 m.s.n.m. En la Tabla 1.1 se describen los límites de la cuenca, algunos barrios asentados en ella, las cotas del nacimiento y del nivel base.

El punto crítico está localizado sobre la quebrada El Chumbimbo, aproximadamente en las coordenadas 832470 m. E. y 1185950 m. N. y una cota de 1550 m.s.n.m. aguas arriba del box culvert que conduce las aguas por debajo de la carrera 80, en el sector conocido como la finca las Mercedes o M10 de la Facultad de Minas. En la margen derecha se encuentran los predios de la Facultad de Minas y en la margen izquierda los predios del convento de las Hermanas Clarisas. El tramo de estudio se extiende a lo largo de 200 metros aguas arriba del box culvert de la Carrera 80 y parte de la urbanización Nebraska. Aguas abajo del box culvert de la Carrera 80, atraviesa los predios de INGEOMINAS en un tramo de cien metros aguas abajo, para un total de 300 metros, ver Figuras 1.1 y 1.2

Tabla 1.1 Localización de la cuenca de la quebrada El Chumbimbo.

Limites	Barrios	Cotas
Sur: con la cuenca de la quebrada la Iguana (específicamente con las quebradas La Corcovada, la Gómez y la Iguaná) Norte: con la quebrada Malpaso. Oriente: con Cerro el Volador Occidente: con el Alto de Yolombó en la serranía de las Baldías.	Vereda Yolombó, corregimiento San Cristóbal. Barrios Civitón, Aures, Palenque, Bello Horizonte, Villa Sofía, El Diamante, Facultad de Minas, La Pilarica y la Unidad Residencial Jorge Robledo.	Nacimiento: cota 1736 m.s.n.m. Nivel base cota 1487 m.s.n.m.

Fuente: tabla modificada de: Instituto para el Manejo Integral de la Cuenca del Río Medellín, Mi Río. Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de las Cuencas la Quintana y Malpaso, 1997. Algunos datos se consultaron de: Franco J., Manuel, Liske C., Carlos E. Estudio Hidrológico y Diseño de una Canal para la Quebrada El Chumbimbo. 1995.

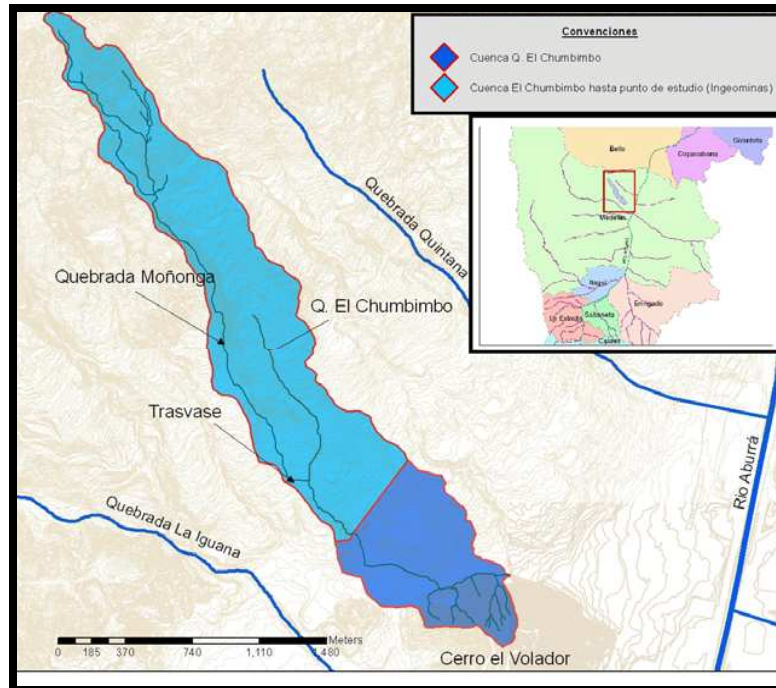


Figura 1.1 Localización de la cuenca de la quebrada El Chumbimbo

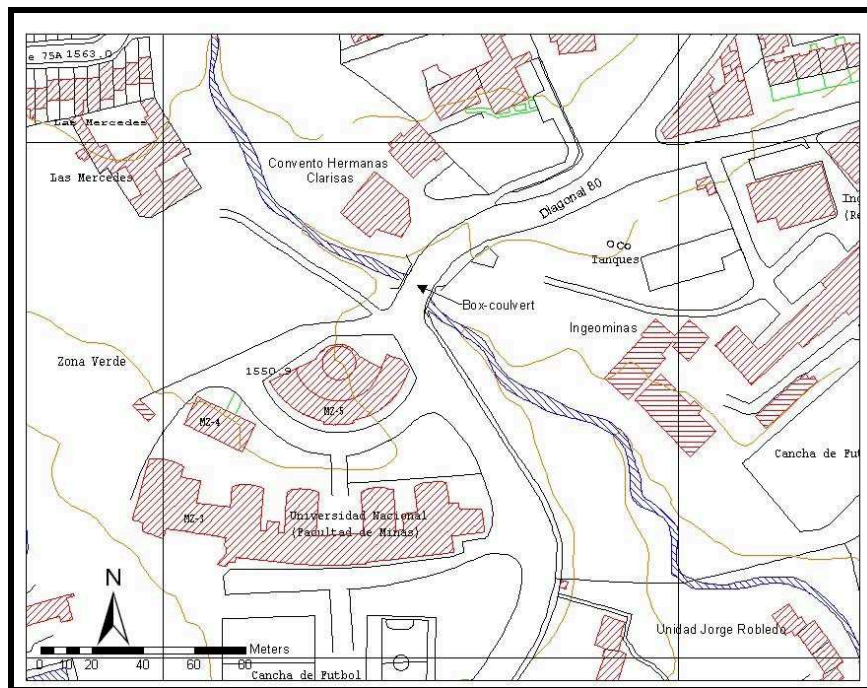


Figura 1.2 Ubicación del punto crítico

1.2 Antecedentes

La dinámica de la quebrada el Chumbimbo ha estado determinada por varias intervenciones antrópicas en su cauce durante los procesos de urbanización. Las que más se destacan en el tramo de estudio son el trasvase de la quebrada La Moñonga y el box culvert de la carrera 80. La primera ha causado el aumento en los caudales y la segunda se ha convertido en un control hidráulico relevante para el cauce. El box culvert sobre la carrera 80 presenta en su entrada, un tramo protegido por muros de contención a ambos lados del cauce acelerando la velocidad del flujo en este punto. Después del cruce de la carrera 80, sector de INGEOMINAS, existen tres presas de retención de sedimentos en concreto reforzado. Al final de dicho trayecto el agua se encausa nuevamente por un box culvert de 650 m de largo que cruza la urbanización Jorge Robledo, el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) y la Facultad de Zootecnia y Veterinaria de la Universidad de Antioquia.

En cuanto al box culvert que pasa por la carrera 80 entre los años 1997-1998 se contrataron por parte del instituto “Mi Río” dos estudios para el diseño de dicha canalización y la mitigación de impactos que pudiera generar la obra en el cauce de la quebrada. Para ese entonces la quebrada conducía su caudal por un demarcado cauce natural y al llegar al sitio en referencia se presentaba un estrangulamiento debido a la escasa sección existente en aquel momento derivada de la acumulación de una gran cantidad de material rocoso movido por la quebrada.

Las consecuencias de dicha acumulación eran visibles en relación a diversos desbordamientos del cauce que inundaban las áreas adyacentes a la finca las Mercedes de la Facultad de Minas y el tramo de la Carrera 80. Por tanto se diseñó la ampliación de la conducción existente y los resultados fueron: el diseño de una sección de 1.87 m de altura efectiva con un ancho de 4.30 m y un espesor de muros

laterales de 0.25 m de concreto reforzado. La nueva solución se empalmó con la estructura existente mediante una junta fría; en cuanto al alineamiento la pendiente promedio del canal fue de 7.5 % para el primer tramo de 6 m de longitud y de 9 % para el segundo tramo de 8 m. (Longitud total de 12 m). Existen además 3 unidades en concreto para obligar que un porcentaje del material transportado sea retenido en dichas estructuras y a la vez se conviertan en cámaras de disipación de energía.

Para el año 2004 la Secretaría del Medio Ambiente contrató la construcción de un muro de contención, con el objeto de encausar de manera efectiva las aguas hacia el box culvert y no permitir la socavación del talud en la Facultad de Minas.

En cuanto a las presas de retención de sedimentos, en Mayo del 2002 fueron entregados por parte de INGEOMINAS al Instituto MI RIO los prediseños de cinco presas localizadas en el sector de INGEOMINAS, numeradas del 1 a la 5 en dirección aguas abajo de la carrera 80, y posteriormente fueron construidas. En la actualidad solo permanecen tres de estas cinco presas, ya que las otras dos fueron destruidas por la dinámica de la quebrada en un evento torrencial máximo. Estas presas tenían como fin la disipación de la energía del flujo y la retención sedimentos.

Las presas se diseñaron para una creciente de 20 m³/s, suponiendo una velocidad de flujo de 7.5 m/s.

Las principales características de las tres estructuras que permanecen en la actualidad se enuncian a continuación:

Presa # 1: Localizada en la abscisa 18 metros, debe tener 1.0m de altura en el vertedero central, la continuación de la estructura hacia los costados, debe tener una inclinación del 20%, inclinación válida para el resto de las presas.

Presa # 2: Localizada en la abscisa 42.5 m, debe tener una altura de 1.5 m en el vertedero central.

Presa #3: Localizada en la abscisa 77.5 m, también debe tener una altura de 1.5 m, similar a la anterior. Por ultimo, por medio del contrato 044 del 2005 la Secretaría del Medio Ambiente propuso los estudios para la ampliación del box culvert que conduce el agua por la Urbanización Jorge Robledo. El diagnóstico que se basa en los reclamos de la comunidad, advierte que el problema tiene entre sus causas principales una reducción de la sección hidráulica (de 8.0 m² en el cauce natural a 7.7 m² a la entrada del box culvert.). Además la corriente posee 12 grados de desviación con respecto al eje del box culvert por lo que este impacta en el muro de la margen derecha disminuyendo la velocidad de flujo. A lo anterior se adicionan condiciones desfavorables como el mal estado de la placa (rugosidad de Manning de 0.028) su baja pendiente ($S < 5\%$) y su larga longitud (160 m hasta el ITM).

También en el año 2005 la Secretaría de Obras Públicas realizó un estudio de obras de protección para la quebrada el Chumbimbo, en el sector de la finca Las Mercedes de la Facultad de Minas. Debido a la creciente problemática en el sector para ese entonces, se diseñaron presas que permitían mantener la pendiente promedio del lecho entre un 4% y un 5% y muros en gaviones para mantener la estabilidad de las bancas. Además, se rediseño el puente peatonal existente en el sector.

Durante los últimos dos años la problemática del sector alrededor a la Facultad de Minas ha entrado en un proceso acelerado de degradación a tal punto que las soluciones antes propuestas para controlar dicha patología son ahora inoperantes y algunas de las estructuras existentes se encuentran seriamente comprometidas como consecuencia del intenso invierno durante los últimos dos años, por lo que se hace urgente una solución integral al problema en predios de la Facultad.

2 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

Para identificar el problema es necesario tener en cuenta que la quebrada el Chumbimbo es un sistema fluvial, en el cual las acciones impuestas sobre cualquier punto tienen consecuencias no solamente a nivel local, sino también aguas arriba y aguas abajo del sitio en cuestión. Por lo tanto, se hizo una inspección inicial del sitio a tres niveles: en el punto crítico, aguas arriba y aguas abajo de dicho punto, de esta forma se tendrán criterios hidráulicos y geomorfológicos suficientes para identificar la problemática de la corriente.

2.1 Punto Crítico

El día 5 de Marzo de 2008 se realizó una visita a la quebrada el Chumbimbo a la altura de la finca las Mercedes en predios de la Facultad de Minas con el fin de identificar los problemas que ha estado presentando este sector de la quebrada desde hace algunos meses. En esta visita se observaron daños en diferentes estructuras hidráulicas, en el enmallado, la cerca de roca y el muro de contención localizados en predios de la Facultad, así como también desestabilización del enmallado de los predios del convento Hermanas Clarisas (Figuras 2.1 y 2.2).

El punto crítico presenta varios problemas. En primer lugar, problemas de socavación asociados a altas velocidades del flujo y remoción del material fino, evidentes en la exposición de las raíces de los árboles y en la caída de material de las márgenes de la quebrada (Figura. 2.2). En segundo lugar, se observa una acumulación de rocas aguas arriba del box culvert de la carrera 80 aunque con un paso continuo de finos. Estas rocas han sido detenidas por dicha estructura reduciendo la capacidad hidráulica del canal. Llama la atención una salida de aguas domésticas a la entrada del box culvert, sobre la margen derecha de la cual no se conoce su área de aporte (ver Figura 2.3).

2.2 Reconocimiento aguas arriba del punto crítico

El día 10 de Marzo de 2008 se realizó una segunda salida, en la que se identificaron que los problemas presentados por la quebrada El Chumbimbo no responden a cambios naturales sino a intervenciones antrópicas, como estructuras tipo box culvert, muros de contención, entre otras estructuras hidráulicas, que han reducido la rugosidad del canal y han aumentado la velocidad y el poder erosivo del flujo. Todos los box culvert inspeccionados aumentan significativamente la velocidad del flujo. Muchas de estas estructuras tiene su nivel base más alto que el nivel del lecho de la quebrada, lo que refleja procesos locales de socavación. Adicionalmente, no están dotadas con estructuras de disipación de energía, son lisas y de pendientes considerables, (Figura. 2.5 y 2.7). Además, dichos problemas han desencadenado daños en las vías y estructuras complementarias. (Figura. 2.6).

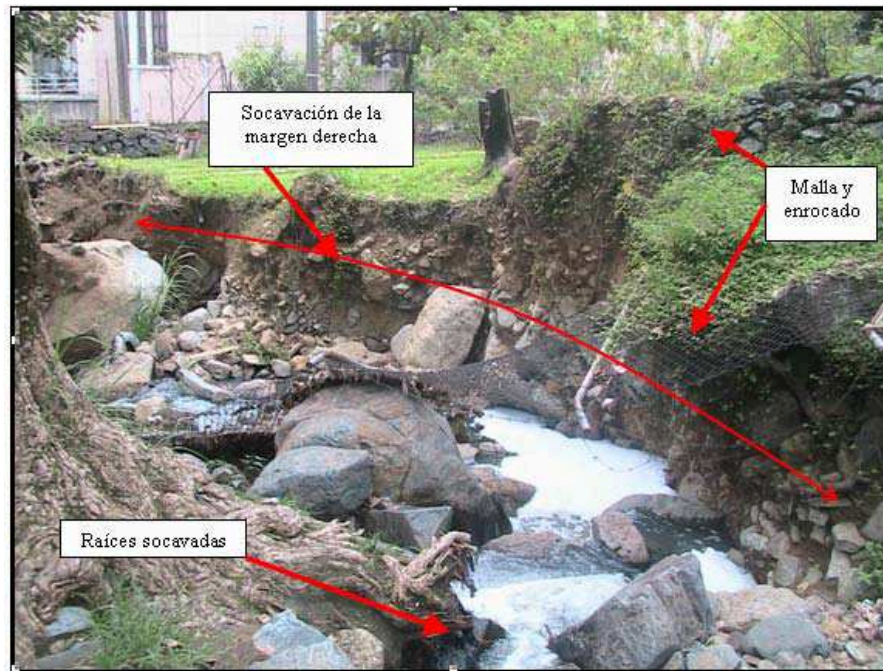


Figura. 2.1 Socavación de la margen derecha de la quebrada en el sector Facultad de Minas.

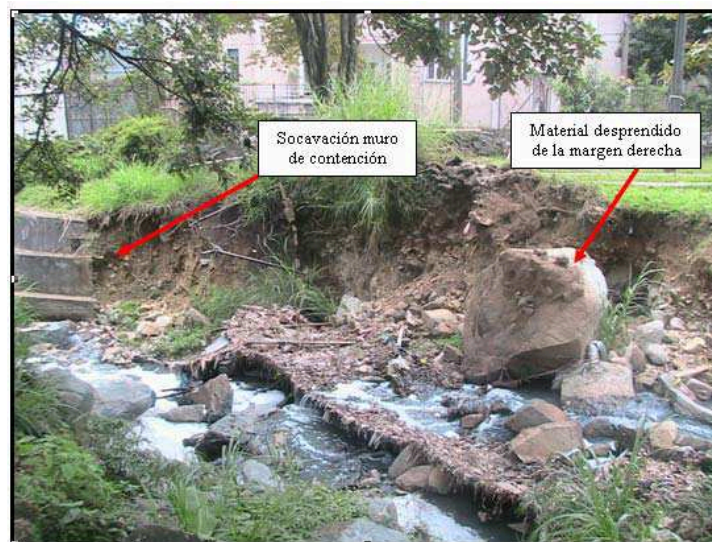


Figura. 2.2 Socavación y desprendimiento de material de la margen derecha de la quebrada El Chumbimbo en el sector Facultad de Minas.

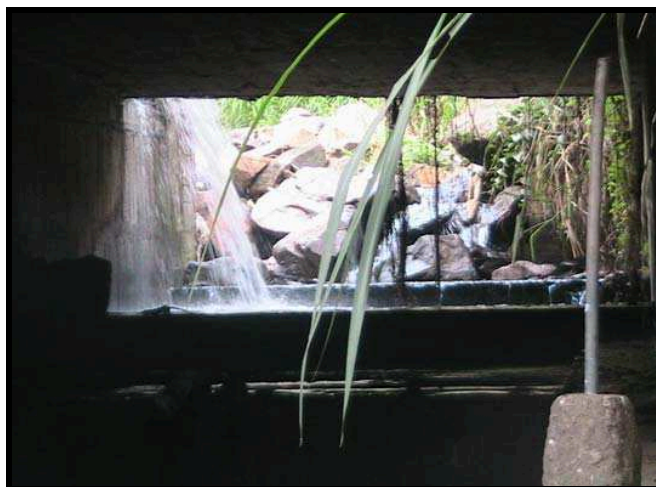


Figura. 2.3 Detención de rocas y entrega de aguas domesticas a la entrada del box culvert de la carrera 80.



Figura. 2.4. Socavación local en el box culvert de la Carrera 87 A



Figura. 2.6 Hundimiento de la vía ocasionado por procesos de incisión en la quebrada el Chumbimbo.



Figura. 2.7 Socavación de la cimentación del box-culvert de la carrera 85.

En el tramo aguas arriba del box culvert de la carrera 85 se observa procesos de reptación en las márgenes. Este proceso se evidencia en la inclinación de los árboles (Figura. 2.8)



Figura. 2.8. Proceso de reptación en un sector de la quebrada El Chumbimbo.

Los problemas de incisión del lecho son los más evidentes y constantes a lo largo del tramo recorrido. Este proceso es ocasionado también por las altas velocidades del flujo que arrastran el material fino y van descubriendo el material grueso que antes estaba bajo el lecho (Figura. 2.9). El material descubierto por los procesos de incisión se reconoce por que presenta aristas angulosas y tamaños considerables. Cabe anotar que durante la visita se midieron profundidades de socavación de hasta 1.85m (Figura. 2.7).



Figura. 2.9 Procesos de incisión en la quebrada El Chumbimbo.



Figura 2.10. Aportes de aguas lluvias y domesticas al cauce de la quebrada el Chumbimbo.



Figura. 2. 11: Trasvase quebrada Moñonga

Así mismo se observa un mal manejo de la cuenca, ya que sobre su cauce es frecuente el arroj de residuos sólidos (Basuras y escombros). También las aguas servidas depositadas a lo largo del cauce y el trasvase de la quebrada La Moñonga a la altura de la urbanización Nebraska han aumentado de manera importante los caudales de la quebrada el Chumbimbo (Figura 2.10)

2.3 Reconocimiento aguas abajo del punto crítico

La tercera visita de reconocimiento se realizó el 12 de Marzo de 2008 con el propósito de visualizar las posibles afectaciones del cauce el sector que comprende los predios de INGEOMINAS aguas abajo del box culvert de la Carrera 80 (Figura 2.12)

En dicho sector se observaron tres presas de retención de sedimentos construidas en concreto. Estas presas han contribuido a disminuir los efectos de socavación del box culvert, regular el flujo y subir el lecho del río. La primera de estas estructuras se observa en la Figuras 2.13 y 2.14.



Figura 2.12. Box culvert de la Carrera 80, sector INGEOMINAS.



Figura 2.13 Presa 1 aguas abajo del box culvert de la Carrera 80.



Figura 2.14. Presa 1, vista aguas arriba.

En la actualidad, las tres estructuras presentan colmatación debido a la falta de mantenimiento. En las figuras 2.15 y 2.16 se muestran las presas 2 y 3 respectivamente.



Figura 2.15. Presa 2



Figura 2.16. Presa 3

Al lado de la tercera presa se observan deslizamientos controlados en gran medida por muros de gaviones. Las Figuras 2.17 y 2.18 muestran con más detalle esta situación.



Figura. 2.17. Deslizamientos en la margen izquierda sección transversal de la presa 3



Figura. 2.18. Vista desde la presa 3.

Aguas abajo de la presa 3 continúan los procesos de socavación. Se observa que la cimentación de la presa está colgada con respecto al nivel actual de la quebrada. (Ver Figura. 2.16 y 2.19).



Figura. 2.19. Detalle de la socavación.

La última estructura observada es un box culvert que atraviesa la unidad residencial Jorge Robledo (Figura 2.20). Esta estructura presenta problemas de falta de capacidad para evacuar crecientes. También se nota como el flujo se encuentra recostado a una de sus paredes. Se sabe que dicha estructura tiene más de 650 m hasta la desembocadura en La Quebrada Malpaso y en su trayecto por la unidad residencial, presenta varias fallas debidas a la socavación del lecho. Además, en predios del ITM dicha estructura cambia de sección y la pendiente promedio es de 5%. Por lo que el flujo se ha recostado a la entrada del box culvert hacia el lado izquierdo del mismo.

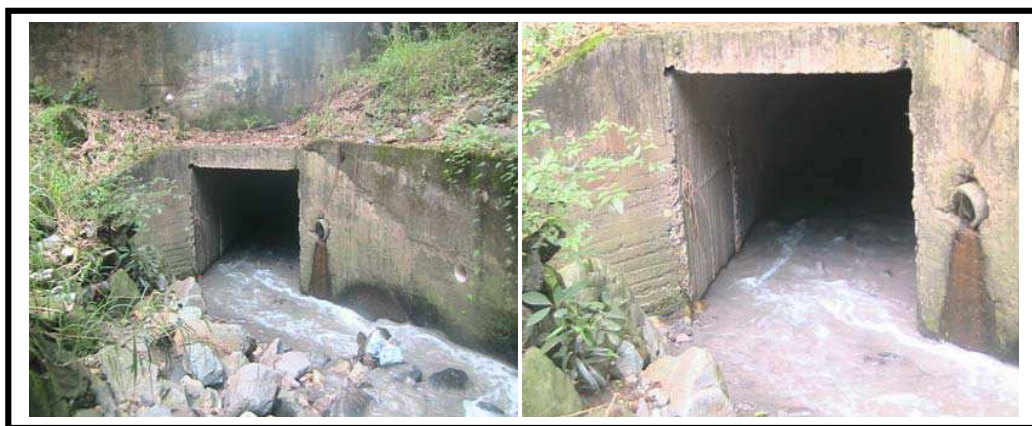


Figura.2.20. Box culvert Unidad Residencial Jorge Robledo predios de INGEOMINAS

2.4 Conclusiones

De acuerdo a lo observado en las visitas de reconocimiento se puede concluir que existen dos problemas fluviales en el sector de la Finca las Mercedes originados, principalmente, como consecuencia de dos intervenciones antrópicas: el transvase de la quebrada la Moñonga a la quebrada el Chumbimbo y la insuficiencia hidráulica del box culvert de la carrera 80. A continuación se hace una descripción de la problemática.

2.4.1 Socavación

La construcción del transvase de la quebrada La Moñonga ocasionó un aumento considerable de los caudales medios de la quebrada El Chumbimbo y de los caudales máximos. Según la ecuación de energía (Ecuación. 1) el aumento de los caudales de la quebrada El Chumbimbo genera mayores velocidades de la corriente y consecuentemente mayor energía de flujo. Esto quiere decir que el canal de la quebrada El Chumbimbo, formado a través del tiempo por caudales más bajos a los actuales, es sometido a energías de flujo mayores, en consecuencia la quebrada El Chumbimbo es ahora capaz de arrastrar sedimentos que antes no arrastraba y en su proceso de equilibrio dinámico ante las nuevas condiciones de flujo se presenta socavación de las orillas y arrastre de material fino del canal.

$$E = Z + H + \frac{v^2}{2g} \quad Q = v \times A \quad (1)$$

Donde,

E=Energía del Flujo

Z=Altura desde una cota de referencia

H=Altura de presión

V=velocidad del flujo

Q= Caudal

A=Área transversal mojada

2.4.2 Capacidad hidráulica del canal

El aumento de los caudales también supone una nueva capacidad hidráulica del canal de la quebrada El Chumbimbo. Pero contrario a la necesidad que tiene el canal de aumentar su capacidad hidráulica, en el sitio crítico la capacidad se ha visto reducida por la acumulación de material grueso aguas arriba del box culvert de la Carrera 80 y por la caída de rocas de gran tamaño de las orillas del canal.

2.4.3 Represamiento

Con el tiempo y la ocurrencia de eventos extremos cada vez más intensos en la quebrada el Chumbimbo, el box culvert de la carrera 80 podría estar generando un represamiento de material, ocasionando mayor insuficiencia de la estructura por taponamiento y elevación de los niveles del flujo.

3 ANALISIS GEOMORFOLOGICO DE LA CUENCA

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Para estudiar estas características se realizó un análisis geomorfológico de la cuenca utilizando la cartografía en medio digital suministrada por la alcaldía de Medellín.

Cartografía digital suministrada por la Alcaldía de Medellín

Curvas de nivel

Usos del suelo urbano y rural

Geología

Cobertura rural

Drenaje

Microcuenca

Zonas de retiro

Pendientes

3.1 Geología Regional

Desde el punto de vista geológico en este sector del Valle de Aburrá se encuentran unidades tanto de rocas ígneas y metamórficas como de depósitos de vertiente y aluviales. A continuación serán descritas las principales unidades litológicas presentes en la cuenca tal como se presentan en la Figura 3.1

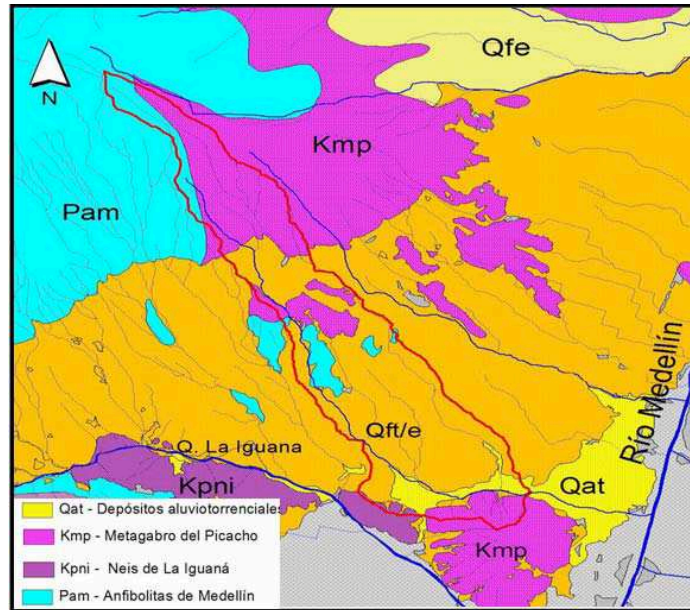


Figura 3.1 Geología regional

- **Anfibolitas (Pam)**

Corresponde a una roca metamórfica de edad paleozoica con estructura masiva o néisica y ocasionalmente esquistosa, formada por cristales de hornblenda y plagioclasa. Esta unidad forma vertientes con pendientes fuertes, dando origen a los escarpes más pronunciados que se encuentran sobre el costado occidental del Río Medellín. En la cuenca del Chumbimbo la anfibolita se presenta desde la parte alta hasta la cota 2400 m.s.n.m. aproximadamente, sobre la cual se encuentran pequeños coluviones de anfibolita.

- **Metagabros del picacho (Kmp)**

La unidad está representada por las rocas que afloran in situ en el cerro El Picacho y el Volador y sus alrededores. A escala macroscópica se caracterizan por poseer un color verde oscuro con manchas o bandas delgadas blancas y por ser moteadas (verdes y blancas). Mineralógicamente presentan anfíboles y minerales del grupo de la epidota y plagioclasas. (Martens y Correa, 2000)

- **Depósitos aluviotorrenciales (Qat)**

Están constituidos por bloques angulares a subredondeados de tamaños hasta métricos, envueltos en una matriz predominantemente limo arenosa, también se encuentran intercalados con flujos de lodos provenientes de las laderas y con depósitos aluviales. Están localizados en la parte baja de la cuenca y corresponden a las terrazas aluviales asociadas al Río Medellín y a los depósitos torrenciales de la quebrada Malpaso y la Quintana.

- **Flujos de lodos y/o escombros (qft/e)**

Este tipo de depósitos son el producto de la acumulación de materiales provenientes de las partes altas de las vertientes. Según la relación entre el porcentaje de matriz y el porcentaje de fragmentos, pueden

darse depósitos con predominio de bloques rocosos denominados “flujos de escombros” o con predominio de la fracción fina (matriz) en cuyo caso se llaman “flujos de lodos”. Este tipo de depósitos se encuentran ampliamente distribuidos en todo el Valle de Aburrá cubriendo las rocas existentes. Estos depósitos están asociados a la dinámica de las corrientes y corresponden a la mayor parte del área de la cuenca.

3.2 Geomorfología

La zona de estudio (figura 3.2) pertenece a la unidad geomorfológica Vertiente Suave en Depósito (Vsd) según el estudio de Microzonificación Sísmica de Medellín (1999). El área estudiada desde el nivel de observación regional, se encuentra en la unidad de paisaje denominada Vertiente Occidental del Valle de Aburrá. A nivel de detalle se diferencian unidades de procesos geomorfológicos de acumulación. El cerro el Volador ejerce un control en el patrón de alineamientos en la parte baja de la cuenca.

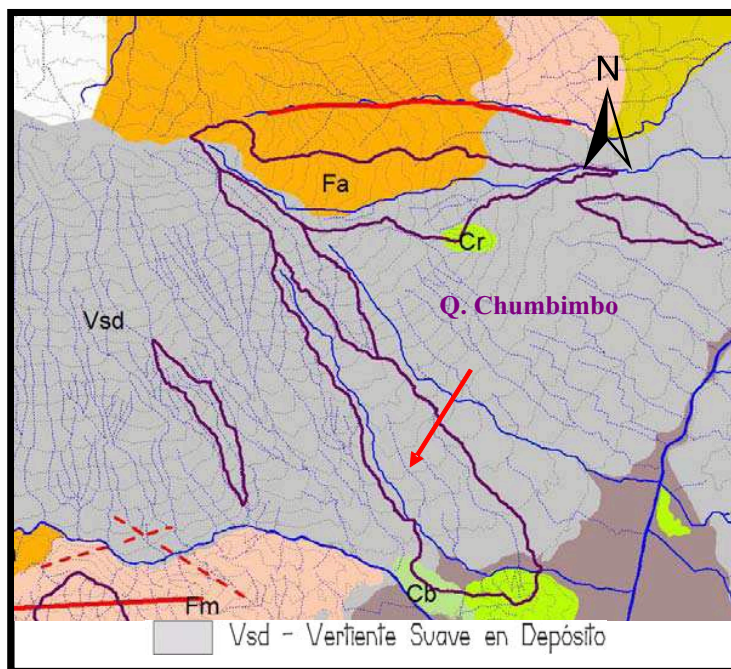
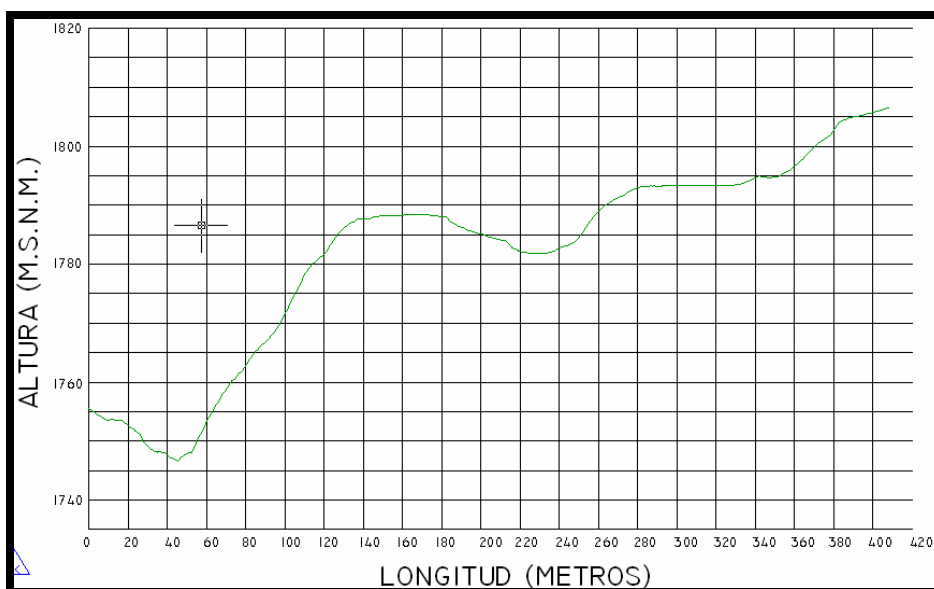
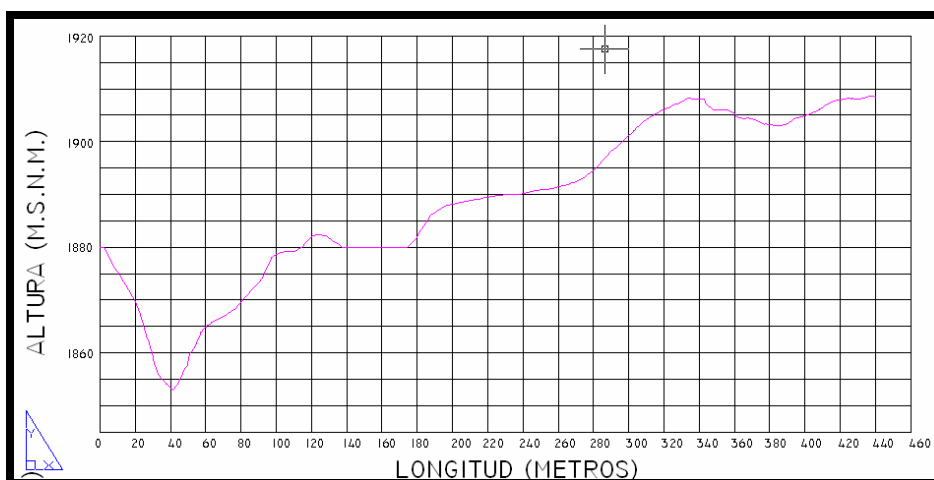
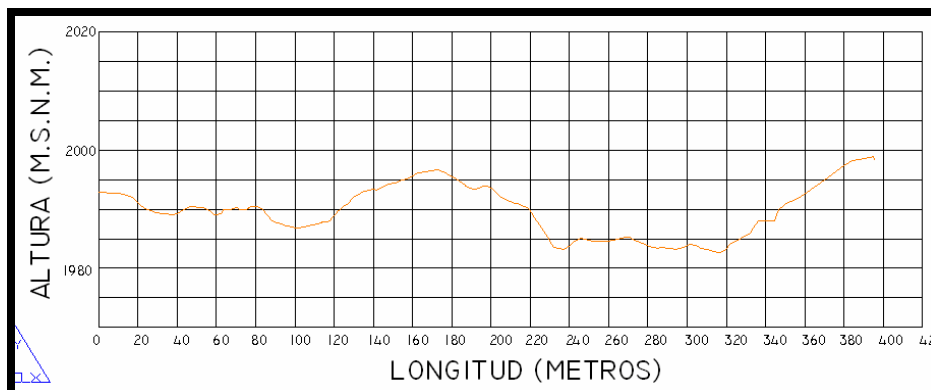


Figura 3.2 Mapa Geomorfológico de la zona de estudio

Según las secciones típicas de la cuenca que se muestran en la Figura 3.3, los sedimentos transportados por el cauce de la quebrada El Chumbimbo provienen de la margen izquierda. Las siguientes figuras están a diferentes alturas en la cuenca y se visualizan desde aguas arriba.



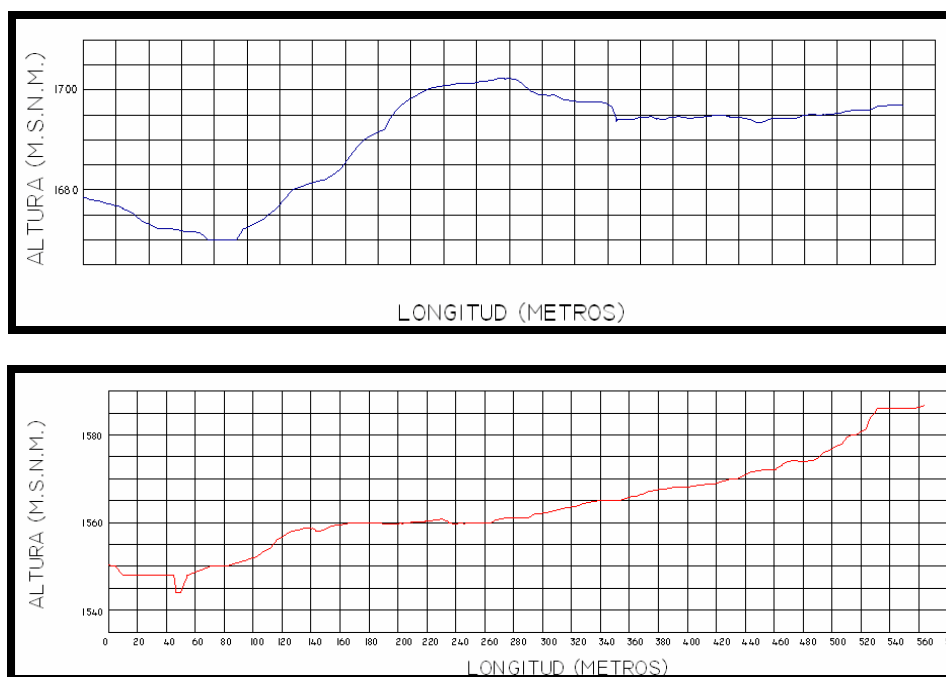


Figura 3.3 Secciones típicas de la cuenca quebrada el chumbimbo

3.3 Procesos Morfodinámicos

Se presentan escarpes erosivos en la cuenca, evidenciándose los procesos como erosión, con este nombre se hace referencia a la actividad erosiva que presenta la quebrada en la base de las laderas que se encuentran en sus márgenes. Este proceso puede deberse a un aumento de caudal o a desviaciones del cauce original, causadas por actividad antrópica o natural. Se presentan también procesos de incisión y socavación de orillas a lo largo del cauce. La incisión hace referencia al descenso del nivel del lecho, debido en el caso de la quebrada el Chumbimbo, al arrastre del material fino. Siendo este el principal proceso geomorfológico presente en la zona de estudio.

3.4 Geotecnia

Como parte de los estudios de campo y las investigaciones realizadas para conceptuar sobre la competencia geomecánica de los geomateriales presentes en la zona de estudio, se revisó la información presentada por la Reevaluación de la Amenaza Sísmica del Área Urbana de la Ciudad de Medellín, la cual dentro de su programa exploratorio realizó una perforación de 31.1 m de profundidad en los terrenos pertenecientes a la Finca Las Mercedes, contiguo a la Facultad de Minas. De acuerdo con el informe de la firma de ingeniería Integral S.A. la estratigrafía resultante de esta perforación se describe a continuación:

Flujo de escombros (0,00 m - 24,50 m): Depósito con bloques de anfíbolita de tamaño diverso, en una matriz de color pardo amarillento, con una resistencia a la penetración estándar muy alta, mínimo de 38 golpes, y rechazos desde los 11,0 m de profundidad. La humedad promedio de este depósito es de

35%, el índice plástico varía entre 15% y 40%, y la fracción fina es de 70% en promedio.

Depósito aluvio-torrencial (24,50 m - 31,10 m.): Bloques redondeados de anfibolita con tamaños hasta de 40 cm. envueltos en una matriz arenosa.

El punto crítico está caracterizado por presentar bloques de tamaños heterométricos en el cauce de la quebrada, indicando el desprendimiento de éstos de los taludes adyacentes; en este tramo el material constituyente de los taludes está compuesto por materiales gruesos granulares, producto de la depositación torrencial de la quebrada, dejando como resultado desde el punto de vista geomecánico materiales que presentan alta resistencia mecánica para soportar cargas verticales que sean aplicadas sobre ellos. En este tramo se presentan taludes con procesos de erosión fuertes, propiciados por el aumento del caudal debido al transvase de la quebrada La Moñonga; en este sector se recomienda construir una estructura para mitigar los problemas que se puedan presentar en un tramo de 100 m aproximadamente, y que además permita dirigir el flujo adecuadamente hacia el box-coulvert. Se anota que el tramo es un canal natural y las zonas de retiro de la quebrada están intervenidas de forma antropica.

3.5 Usos del Suelo

Parte alta: esta zona presenta un uso del suelo con actividades típicas de la zona rural, aunque restringidas básicamente a la práctica de la ganadería de tipo extensivo en predios de extensión media. Otro uso presente es el forestal en un lote con plantación de cipreses (Instituto para el Manejo Integral de la Cuenca del Río Medellín. Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de las Cuencas la Quintana y Malpaso, 1997). Las coberturas del suelo comprenden básicamente:

- **Plantaciones forestales:** presente en la parte alta de la cuenca y corresponden a cipreses plantados sobre la margen derecha del ramal principal.
- **Pastos:** representa la mayor parte de la cobertura vegetal, se encuentra principalmente en la parte alta y media de la cuenca.
- **Cobertura mixta:** son aquellas zonas donde predomina los pastos pero existen árboles aislados. (Plan de Ordenamiento)
- **Uso mixto urbano-rural.**

Parte media: Predomina el uso residencial con algunas zonas verdes alrededor de las corrientes de agua y en zonas recreativas.

Parte baja: esta en su mayor parte urbanizada. Se presenta uso residencial, industrial, institucional y recreacional.

A partir de los usos del suelo consultados se obtuvieron los valores CN, necesarios para correr el modelo hidrológico. En la Figura 3.4 y en tabla 3.1 se muestran los usos del suelo, su participación espacial en la cuenca y los valores CN¹.

¹ Chow, Ven T. Hidrología Aplicada, 1994.



Figura 3.4 Usos del Suelo para la quebrada el Chumbimbo

Tabla 3.1. Usos del suelo, participación espacial y valores CN en la quebrada El Chumbimbo.

Uso del suelo	Área (m ²)	% Área	CN
Forestal protector	71238.71	5.1	77
Uso mixto	253326.29	18.1	74
Uso mixto urbano-rural (Residencial 38% impermeable)	12214.42	0.9	83
Áreas y Corredores de Actividad Múltiple de Cobertura Zonal	28961.94	2.1	98
Corredor Barrial	14164.05	1.0	98
Equipamientos generales o de Ciudad (Residencial 38% impermeable)	166494.74	11.9	83
Residencial tipo 1(65% impermeable)	772961.21	55.3	90
Verdes	79638.64	5.7	74
Área Total	1399000.00	100.0	

3.6 Perfil altimétrico

La extracción del perfil altimétrico del cauce permite definir puntos donde se dan cambios en la pendiente, de más fuerte a más suave o viceversa e inferir procesos de agradación o degradación de la cuenca. En las Figuras 3.5 y 3.6 se presenta el perfil altimétrico.

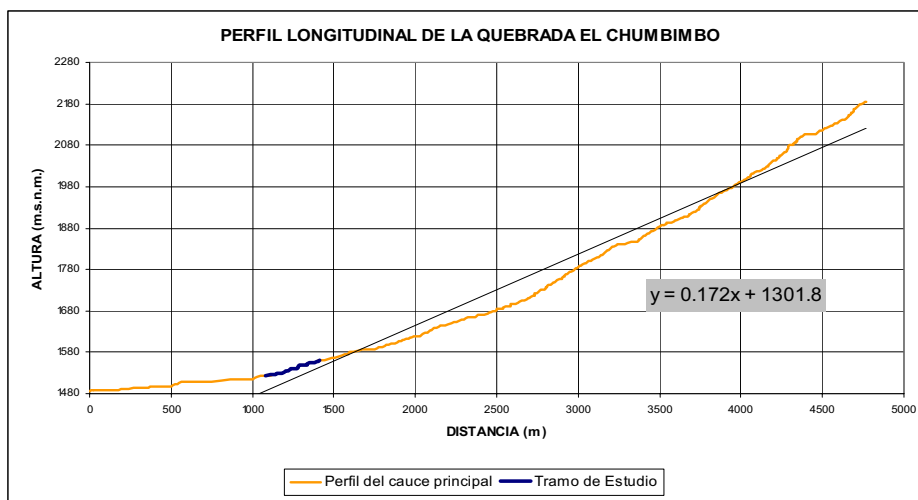


Figura 3.5 Perfil Altimétrico de la quebrada Chumbimbo hasta su nivel base en la quebrada la Malpaso.

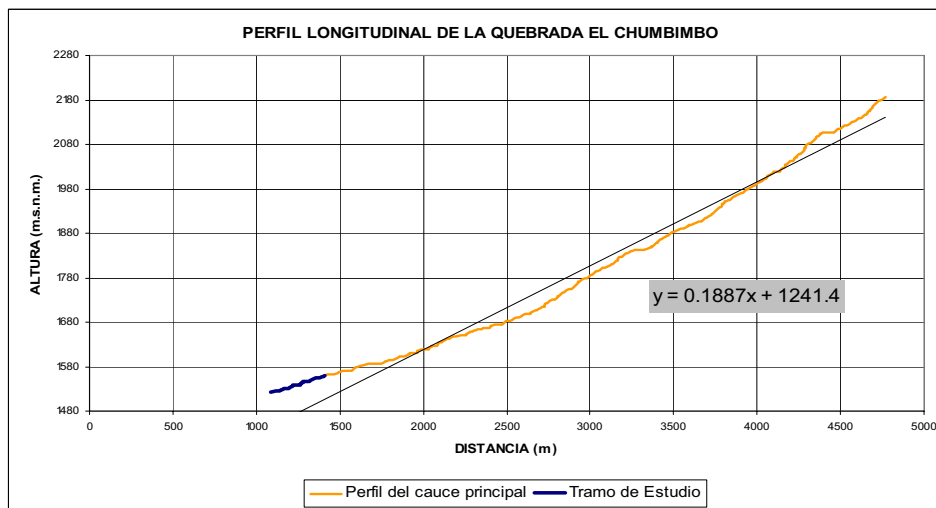


Figura 3.6 Perfil de la quebrada la quebrada El Chumbimbo hasta el tramo de estudio.

El perfil del cauce principal de la quebrada El Chumbimbo presenta dos cambios significativos en su pendiente (Figura 3.4). Del análisis de esta gráfica se puede concluir que entre las abscisas 1700 y 2200 se presentan fenómenos leves de degradación y corresponde a la zona de producción de sedimentos de la quebrada. Entre las cotas 1522 y 1700 predominan los procesos de transporte, aunque existen procesos de degradación (incisión y socavación) como se pudo concluir de las visitas de reconocimiento. A esta zona pertenece el tramo de estudio. Y una última zona entre las cotas 1478 y 1522 donde el cambio de pendiente es menos significativo y en la que es difícil establecer gráficamente los procesos que predominan.

3.7 Pendientes

Se generó un mapa de pendientes con ayuda del software ARCGIS y a partir de la cartografía disponible. La pendiente promedio para toda la cuenca es de 24.9% y para la cuenca delimitada hasta el punto crítico la pendiente arrojada fue del 26.27%. En la figura 3.7 se presenta el mapa de pendientes obtenido para la cuenca de la quebrada EL Chumbimbo. Como es posible observar, la cuenca en estudio posee pendientes muy variables, en la parte alta predominan las pendientes altas, entre 30% y 50%. Estas pendientes indican el potencial de agradación presente en este sector. En el tramo de estudio existe una zona de pendientes que varían entre 0% y 15% correspondiente a los predios de la Facultad de Minas. Y una zona de pendientes fuertes que varían entre 0% y 50% correspondientes a las laderas de la quebrada en los predios de Ingeominas.

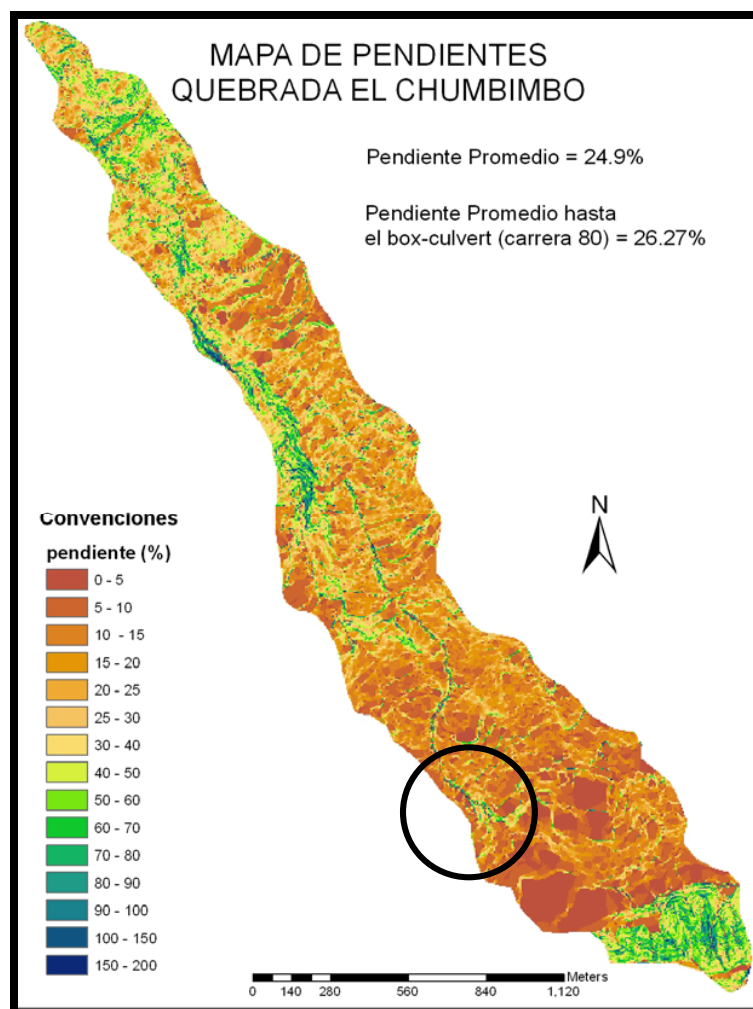


Figura 3.7 Mapa de pendiente de la cuenca de la quebrada Chumbimbo

3.8 Parámetros Morfométricos

Par el cálculo de los parámetros morfométricos se utilizó la cartografía suministrada por la Alcaldía de Medellín en medio digital. Se trazó la divisoria de aguas y se generó un modelo de elevación del terreno (Figuras 3.8).

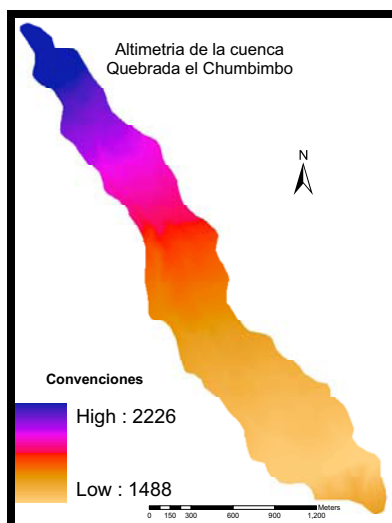


Figura 3.8 Modelo digital del terreno de la Altimetría para la quebrada el Chumbimbo.

A partir del modelo digital de elevación (Figura 3.7) y el mapa de pendientes (Figura 3.6), y con la ayuda del software ARCGIS se obtuvieron los parámetros morfométricos de la cuenca, los cuales se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Chumbimbo

Parámetro	Unidades	Valor
Área de drenaje	km ²	1.399
Perímetro de la cuenca	km	7.970
Longitud Cauce principal	km	3.750
Longitud río hasta la divisoria	km	3.860
Pendiente cauce principal	%	18.870
Pendiente cuenca	%	26.270
Cota mayor cuenca	m	2226
Cota menor cuenca	m	1524
Cota mayor río	m	2188
Cota menor río	m	1524
Longitud cauce al centroide	km	3.416
Longitud al punto más alejado, Longitud de la cuenca	km	3.300
Relación de elongación		0.346
Factor de forma de Horton		0.094
Coeficiente de Compacidad		1.900

Como podemos observar el factor de forma y el índice de compacidad de la cuenca Chumbimbo indica una forma alargada. Cuanto más alargada sea la forma de la cuenca más se demora en llegar la onda de crecida a la desembocadura, pero al mismo tiempo más acentuado es el caudal pico.

4 ANALISIS GEOMORFOLÓGICO DEL CAUCE

4.1 Clasificación de la cuenca y la Corriente

La cuenca se caracteriza por presentar laderas convexas, los drenajes presentan cauces en forma de "U" y la red de drenaje se clasifica como sub-paralela, es decir, presenta una forma alargada.

La quebrada Chumbimbo-Moñonga se puede clasificar según su permanencia en el tiempo y el espacio como perenne. Según su patrón de alineamiento el cauce es recto, es decir el flujo se mueve creando una secuencia de tramos rectos con sección aproximadamente uniforme y tramos con sección más profunda a lo largo del canal. Por otra parte su alineamiento es controlado en la parte baja por el cerro el Volador. Según su perfil longitudinal es una corriente bien gradada, es decir no presenta cambios abruptos en su pendiente.

Según el material del lecho, la quebrada puede considerarse dentro de los esquemas de los ríos de grava cuyo lecho se asienta sobre aluviones y/o coluviones. La quebrada se caracteriza por tener peldaños longitudinales formados por grandes clastos organizados en acumulaciones discretas a lo ancho del cauce separadas por pozos de material más fino, morfología asociada a pendientes empinadas, y al confinamiento pronunciado. Tales características clasifican la corriente dentro de los ríos de montaña.

4.2 Mediciones de campo

4.2.1 *Conteo de Piedras*

La composición del lecho de la corriente es una característica importante, ya que esta influencia la forma del canal, la hidráulica, tasas de erosión, la disponibilidad de sedimentos y otros parámetros.

La técnica básica más eficiente para caracterizar la composición del lecho es el conteo de piedras de Wolman (1954). Este consiste en realizar un muestreo aleatorio del lecho de la corriente distribuido en una malla rectangular definida en un área de dimensiones $2B \times B$, donde B es el ancho superficial de la sección. En este procedimiento se mide la longitud mayor de la cara expuesta de la partícula que se encuentre ubicada exactamente debajo de cada punto de intersección de la malla. En el tramo de la zona de estudio se hizo un conteo de piedras para caracterizar la composición del lecho (Figura 4.1). Se definió una maya de 100 puntos que sirvieron como referencia para medir 100 muestras. En la tabla 4.1 se muestra la distribución granulométrica obtenida del conteo de piedras.



Figura 4.1. Trabajo de campo. Conteo de piedras

Tabla 4.1. Distribución granulométrica. Conteo de piedras.

Material	Tamaño de Partícula	Rango (mm)		#	TOTAL	%	%Acum	Di (mm)
ARENAS	Arenas	<	2	8	8	8.00	8.00	1.41
GRAVAS	Muy Finas	2	4	6	33	6.00	14.00	2.83
	Finas	4	8	2		2.00	16.00	5.66
	Medias	8	16	6		6.00	22.00	11.31
	Gruesas	16	32	9		9.00	31.00	22.63
	Muy Gruesas	32	64	10		10.00	41.00	45.25
GUIJARROS	Pequeños	64	128	19	36	19.00	60.00	90.51
	Grandes	128	256	17		17.00	77.00	181.02
ROCAS	Pequeños	256	512	9	23	9.00	86.00	362.04
	Grandes	512	1024	7		7.00	93.00	724.08
	Muy Grandes	1024	2048	7		7.00	100.00	1,448.15

4.2.1.1 Diámetros y propiedades características de la curva Granulométrica

Con base en el conteo de piedras se obtuvo la distribución de frecuencias de los diferentes tamos de grano y la curva granulométrica que se muestran en las figuras 4.2 y 4.3, respectivamente.

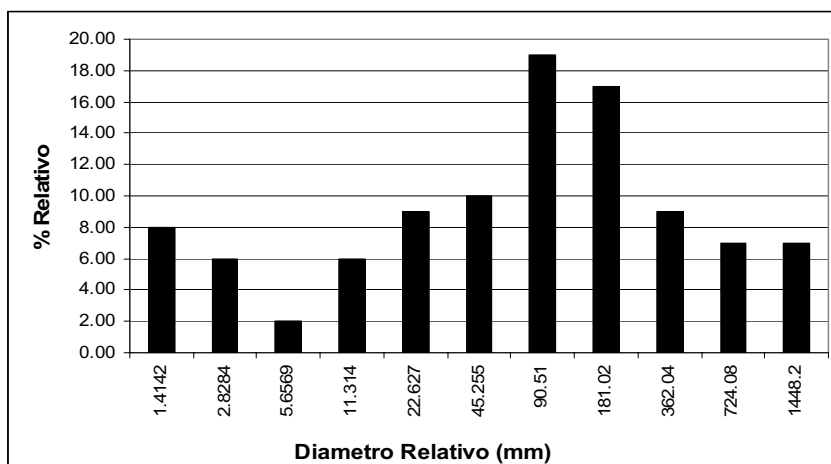


Figura 4.2. Distribución de frecuencia del tamaño de granos.

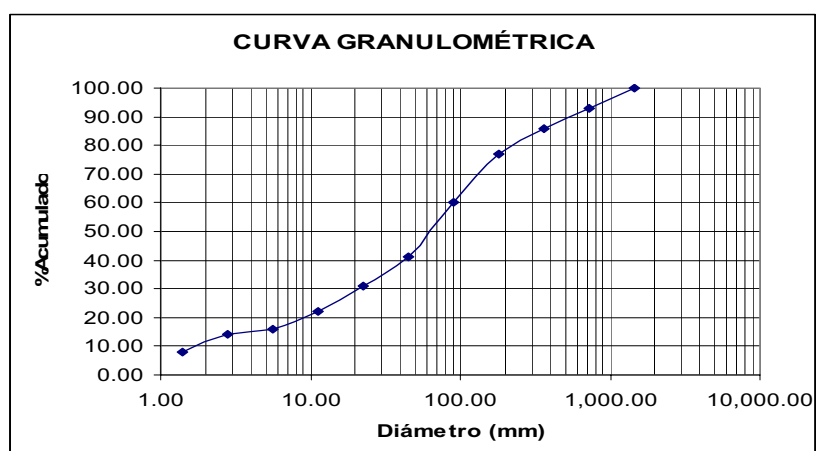


Figura 4.3 Curva granulométrica.

De la curva granulométrica en la Figura 4.3, se observa que el lecho está compuesto por tamaños grandes de material pétreo y que el material fino como arenas y limos forman un porcentaje bastante bajo, la distribución de los porcentajes por clases de material se presenta en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Porcentaje por clases de material

Clase	%
Arenas	8
Gravas	33
Guijarros	36
Bloques Grandes	23

El D_{50} hallado fue de 66.7 mm. El D_{90} fue estimado como el promedio de los 14 tamaños de las piedras de mayor tamaño que se encontraron a lo largo del cauce. A continuación en las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan los diámetros y propiedades características de la curva granulométrica.

Tabla 4.3. Diámetros característicos

Diámetro	(mm)
D_{16}	5,7
D_{50}	66,7
D_{65}	117,1
D_{75}	170,4
D_{84}	321,8
D_{90}	1538,6

Tabla 4.4 Coeficientes de gradación

σ_g	7.54
Gr	8.31
Dg	42.67

4.2.1.2 Rugosidad del canal

La rugosidad se puede obtener a partir de los diámetros característicos de los sedimentos obtenidos del conteo de piedras. Varios autores han relacionado diámetro de las partículas con la rugosidad tal como se muestran en la tabla 4.5

De acuerdo a las ecuaciones de la Tabla 4.5 y tomando en cuenta la Tabla 4.3 de diámetros característicos, se seleccionó la rugosidad de 0.03 hallada como un promedio entre Bray Y Posada (Lechos Grava). Los resultados de tales métodos se presentan en la Tabla 4.6

Tabla 4.5. Rugosidad en función del diámetro de las partículas

Bray	$\eta = 0.041 \cdot D_{50}^{1/6}$	m
Strickler	$\eta = \frac{D^{1/6}}{21.1}$	ft
	$\eta = \frac{D_{50}^{1/6}}{31.3}$	mm
	$\eta = \frac{D_{75}^{1/6}}{75.75}$	in
Lane y Carlson	$\eta = \frac{D_{75}^{1/6}}{39}$	in
Keulegan	$\eta = \frac{D_{50}^{1/6}}{46.9}$	ft
	$\eta = \frac{D_{90}^{1/6}}{49}$	ft
	$\eta = \frac{D_{65}^{1/6}}{29.3}$	ft
Posada	$\eta = 0.0487 \cdot D_{50}^{1/6}$	m

Tabla 4.6 Rugosidad estimada con diferentes ecuaciones

AUTOR	n	UNIDADES
BRAY	0.0261	m
STRICKLER	0.0167	ft
	0.0292	mm
	0.0381	in
LANE Y CARLSON	0.0250	in
KEULEGAN	0.0196	ft
POSADA	0.0310	m

4.2.2 Caracterización de las bancas

En base a las observaciones de campo se puede asumir que el tamaño medio del material de las bancas es equivalente al tamaño medio del material del lecho. Sin embargo dichas bancas en muchas zonas están invadidas por la vegetación lo que aumenta su rugosidad. En la Figura 4.4 se muestra un ejemplo del material de las bancas.



Figura 4.4 Esquema característico de las bancas